

레이저 탄성산란법, 여기적열법, 자발광을 이용한 가시화 디젤엔진의 후기연소의 2차원 soot 분포 측정

노승민*, 원영호**, 박정규***, 최인용****, 전광민*****

Measurments of 2-D Image Soot Distribution in Late Combustion Stage Using Elastic Scattering, Laser-Induced Incandescence and Flame Luminosity

S. M. Noh, Y. H. Won, J. G. Park, I. Y. Choi, K. M. Chun

Key Words: Laser Elastic Scattering(레이저 탄성산란법), Laser-Induced Incandescence(레이저 여기적열법), Optically Accessible Diesel Engine(가시화 엔진), Late Combustion(후기 연소), Flame Luminosity(자발광)

Abstract

Soot formation and oxidation is closely related to the combustion phenomena inside a diesel engine. Laser-based diagnostics provide a means for improving our understanding of diesel combustion, because they have highly temporal and spatial ability.

To understand the soot behavior we did preliminary study by taking flame luminosity photographs and 2-D imaging soot distribution using Laser Elastic Scattering(LIS) and Laser-Induced Incandescence(LII)

From the data we found that soot concentration was high in the bowl and disappeared from the central region in the late combustion stage

1. 서론

디젤엔진은 열효율이 가솔린에 비해 우수하기 때문에 현재와 같은 고유가 시대에 많은 관심을 끌고 있다. 그러나 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 압축비가 높고 연소특성상 유해물인 NOx와 soot을 더 많이 배출시킨다. 이러한 배출물을 줄이기 위해서는 연소실형상의 개선, 고압연료분사,

연소의 개선, 후처리등이 강구되어 왔다. 특히 연소의 개선을 위해서는 연소현상을 정확히 측정하는 것이 필요하다. 레이저 진단기술은 시간적, 공간적 분해능이 높기 때문에 비정상, 비균질의 디젤엔진의 연소현상을 측정하는데 적합하다.

본 연구에서는 레이저 탄성 산란법(LIS)와 레이저 여기적열법(LII)을 통해 디젤 후기연소 시 soot의 분포를 2차원적으로 측정하였으며, 아울러 고속 디지털 카메라를 통해 화염의 자발광을 촬영하고 그 분포를 레이저 측정법의 분포와 비교 분석하여 soot의 생성과 소멸에 대한 이해를 증진시키는데 목적을 두었다.

*연세대학교 대학원

**울산대학교

***건국대학교

****연세대학교 대학원 박사졸업

*****연세대학교

2. 실험장치 및 방법

2.1 레이저 탄성산란법과 여기적열법⁽⁸⁾

탄성산란법은 레이저광이 입자에 입사되면 입자에 의하여 레이저광이 반사 혹은 굴절에 의하여 광로가 변경되는 현상, 즉 산란현상을 이용하여 입자를 가시화하는 방법이다. 하지만 입자의 구별이 곤란하여 특정 입자만을 선별하여 가시화하기가 어렵다는 단점이 있다.

여기적열법은 강력한 레이저광으로 광흡수율이 높은 입자를 가열하여, 고온이 된 입자로부터 복사광을 검출하여 가시화하는 방법이다. 화염 중 soot입자는 주성분이 탄소이기 때문에 레이저 펄스광이 입사되면 펄스 기간 중에 soot입자 온도가 4500K까지 가열되어 적열광이 나오며 이때 특정파장을 필터를 통해서 데이터를 취득하는 방법이다. 탄성산란법에 비해 soot 입자만을 선별적으로 가시화가 가능하지만 적열광 측정을 위해서는 높은 레이저의 출력이 요구되고 광의 강도가 1/100정도로 미약하다. 따라서 높은 화상데이터를 얻기 위해서는 노출시간이 레이저 펄스기간중에 맞출 수 있는 고속 셔터 카메라가 필요하다.

2.2 실험장치

2.2.1 가시화 엔진

본 연구에서 대동공업의 10마력 단기통 디젤엔진(ND-130DD)을 가시화를 위해 개조한 엔진을 사용하였다. 그 제원은 Table 1에 있다.

Table 1 Specification of test engine

Bore × Stroke	95 × 95
Cooling Water Temp.	80℃
Intake Air Temp.	70 ~ 80℃
Compression Ratio	18
Intake Open	BTDC20°
Intake Close	ATDC44°
Exhaust Open	BTDC44°
Exhaust Close	ATDC20°
Injection Time	BTDC19°
Injection Open Pressure	225kg/cm ²

Fig 1은 가시화 엔진의 단면도이며, 레이저 시트

가 입사 연장판을 통해 연소실내에 입사되면 산란된 빛은 피스톤 관찰창을 통해 광학경에 입사되어 화상데이터를 취득할 수 있다.

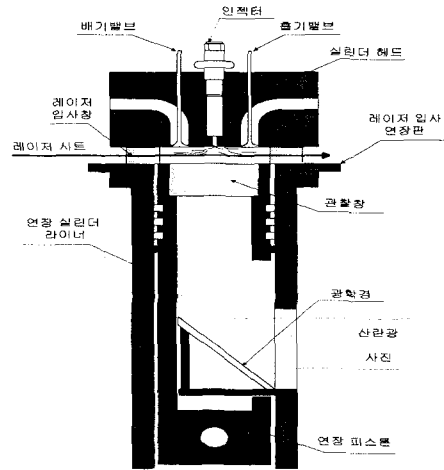


Fig 1 A cross section diagram of optically accessible diesel engine

레이저시트광이 연소실내에 투입되게 하기 위해서 Fig 2와 같이 레이저시트 입사 연장판을 실린더헤드와 연장실린더 라이너 사이에 놓고 조립하였고, 피스톤도 그 길이 만큼 연장하였다.

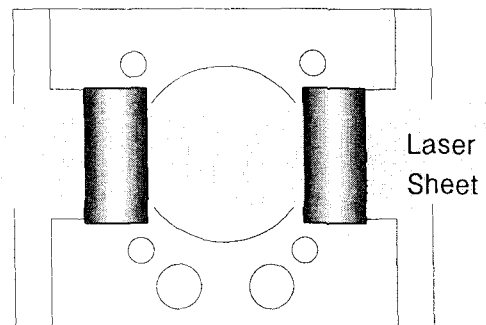


Fig 2 The plate to pass laser sheet

피스톤은 화염과 soot의 분포를 관찰 할 수 있도록 아크릴로 Fig 3과 같이 제작하였고, 가공 후 연마를 하여 화상의 굴절율을 감소 시켰다.

2.2.2 광학장치

soot의 가시화를 위해서는 에너지 밀도가 높은 펄스레이저를 이용해야 하며, 레이저 시트는 cylindrical lens와 spherical lens의 조합을 이

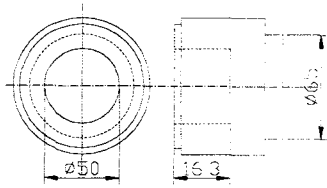


Fig 3 Acryl Piston

용하여 레이저빔을 2차원 평면 시트로 만들기 위해 Fig 4와 같이 구성하여 38mm의 폭과 300 μm 의 두께를 가지는 레이저 시트를 만든다. 좀더 균일한 레이저시트를 위해서 iris로 가장자리를 자르고 가운데 50%만을 사용하였다.

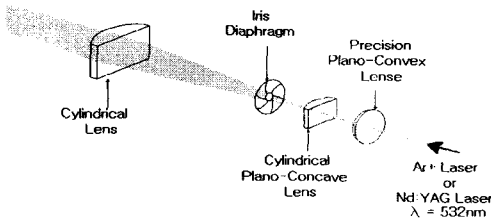


Fig 4 The apparatus of optics

2.2.3 레이저와 카메라

LII를 실험하기 위해서는 광의 강도가 강한 펄스 레이저를 사용하여야 하며, 그 펄스 시간에 동기화 시킬 수 있는 카메라 필요하다. Table 2는 레이저와 카메라의 제원이다.

고속 디지털 카메라는 자발광을 찍을 목적으로 사용하였으며 레이저 진단방법이 아니므로 레이저와 광학장비는 사용하지 않았다. 자발광을 촬영시 광 증폭기를 장착하여 더욱 선명한 이미지의 데이터를 취득하였다.

2.3 실험방법 및 동기화

VS모터로 엔진을 구동하여 어느 정도 정속도가 유지되면 연료를 분사시켜 1000rpm 무부하로 구동되도록 제어한다. 이때 엔진에서 나오는 엔코더 Z펄스와 B펄스를 받아 계산하여 TDC 후 원하는 각도에 TTL신호가 나오도록 컨트롤 박스를 설계하였다.

Table 2 The specification of Apparatuses

Nd:YAG Laser	
Name	SL803G
Company	Spectron Laser System
Wavelength	532nm
Pulse Duration	5~7ns
ICCD camera	
Name	ICCD Single Frame Camera
Company	V-Tek
Gate Time	$\geq 100\text{ns}$
Flame/Sec	1
Hi-speed camera	
Name	HG2000
Company	KODAK
Gate Time	$\geq 23\mu\text{s}$
Flame/Sec	≤ 2000

컨트롤 박스에서 나온 신호를 DG535(Digital Delay Pulse Generator)가 받아 카메라와 레이저를 동기화 시킨다.

Fig 5는 LIS와 LII의 실험장치에 대한 개략도이다.

레이저광이 나와서 광학장치를 거쳐 시트빔을 만들게 되어 연소실 내부의 화염을 지나가게 된다. 이때 ICCD 카메라가 그 광원을 촬영한다.

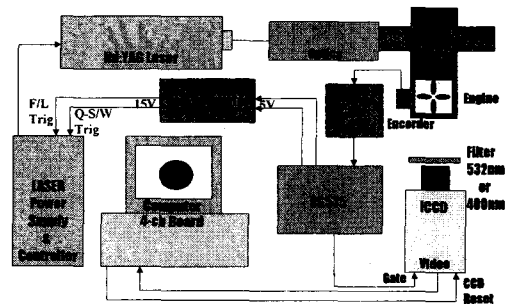


Fig 5 The diagram of the experimental apparatus to LIS and LII

노출시간 300ns에서 초당 1프레임을 촬영하였으며 한번 실험시 20프레임의 영상을 획득하였다. 그 데이터들은 640x480화소의 파일로 컴퓨터에 저장된다. LIS와 LII는 따로 촬영하였으며 LIS는 532nm, LII는 400nm의 밴드패스 필터를 사용하여 특정파장을 잡았다.

Fig 6은 ICCD와 레이저를 동기 시키기 위한 TTL신호를 간략하게 나타낸 것이다.

고속 디지털 카메라를 이용하여 자발광을 촬영

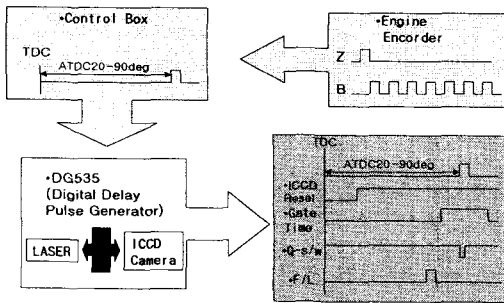


Fig 6 Schematic diagram of TTL signals to synchronize

하였으며, 촬영시 광원만을 촬영하기 위해서 광증폭기를 장착하여 더 선명한 자발광 데이터를 취득하였다. 노출시간은 23 μ s이며 초당 2000프레임을 촬영하였으며 데이터는 512 \times 144 화소의 파일로 컴퓨터에 저장된다. Fig 7은 자발광 촬영에 대한 실험장치의 개략도이다.

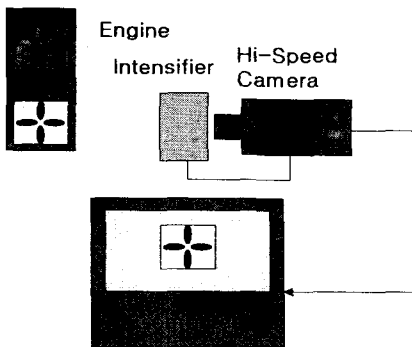


Fig 7 The diagram of experimental apparatus to flame luminosity

3. 실험결과

Fig 8은 가시화엔진의 데이터 취득영역의 개략도이다. 노즐은 약 1cm정도 편심되어 있으며 LIS와 LII의 데이터 취득영역은 레이저시트광이 지나가는 영역과 아크릴 피스톤의 관찰창 부분의 겹쳐진 영역이다. 그리고 자발광의 데이터 취득영역은 관찰창 전체의 영역이다.

Fig 9은 고속 디지털 카메라를 통하여 연소시 자발광을 촬영한 데이터들이다. Fig 9과 Fig 10의 이미지는 포토샵에서 grayscale처리를 해줌으로 이미지의 명암을 분명하게 하여 해상도를 높

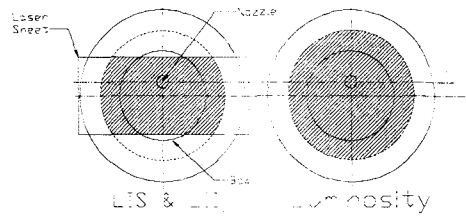


Fig 8 The diagram of measurement area

였다. 노즐의 위치가 위쪽으로 편심되어 있으며 노즐의 구멍은 4개이다. 화염의 모습에서 볼 수 있듯이 약간의 스월이 존재함을 알 수 있는데 그 이유는 흡기관의 형상 때문이다. 화염이 발생되어 보울에 부딪치게 되면서 화염이 점차적으로 퍼지게 되고 피스톤 스퀘시 영역까지 번져나가는 것을 볼 수 있다. 화염은 퍼진 후 중간지역부터 소멸되는 것을 볼 수 있는데 이것은 노즐에서 분무가 끝난 후 분무된 액적들이 가장자리로 퍼져나가서 중간부분에는 더 이상 액적들이 존재하지 않기 때문이다. 화염의 말기에는 거의 비슷한 경향을 볼 수 있으며 스월의 운동성도 거의 소멸되고 있음을 알 수 있다.

Fig 10은 LIS와 LII의 신호를 촬영한 것이다. ATDC 20~90° 사이에서 10° 간격으로 촬영하였으며, 각 각도당 20회의 영상을 취득하였고, 광신호가 있는 부분 즉 환한 지역이 soot이 존재하는 지역이다. 두 신호들을 비교해 보면 LII신호가 LIS신호보다 더 약하다는 것을 알 수 있다.

LIS에서 보울안에서 soot의 신호가 20° 에서 50° 사이에서 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. LIS신호는 화염내 soot뿐 아니라 액적이나 혹은 연소시 다른 이물질에 의해서 광신호가 나올 수 있다. 하지만 분무는 BTDC19° 에서 시작해서 TDC가 되면 분사가 이미 종료가 되므로 액적일 가능성은 희박하다. 또한 다른 이물질에 의한 영향은 20회 이상의 영상을 비교해 볼 때 배제될 수 있다.⁽⁹⁾

LIS신호와 LII신호를 비교해 보면 soot의 분포는 보울벽에서부터 생겨나서 보울의 중심에서부터 사라져 가는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 보울벽의 온도가 연소실내의 온도보다 상대적으로 낮기 때문에 화염이 보울벽에 부딪치면서 불완전 연소로 인한 soot의 생성율이 커져서 생겨난 것이라고 생각 한다. ATDC60° 이후에서 보면 soot

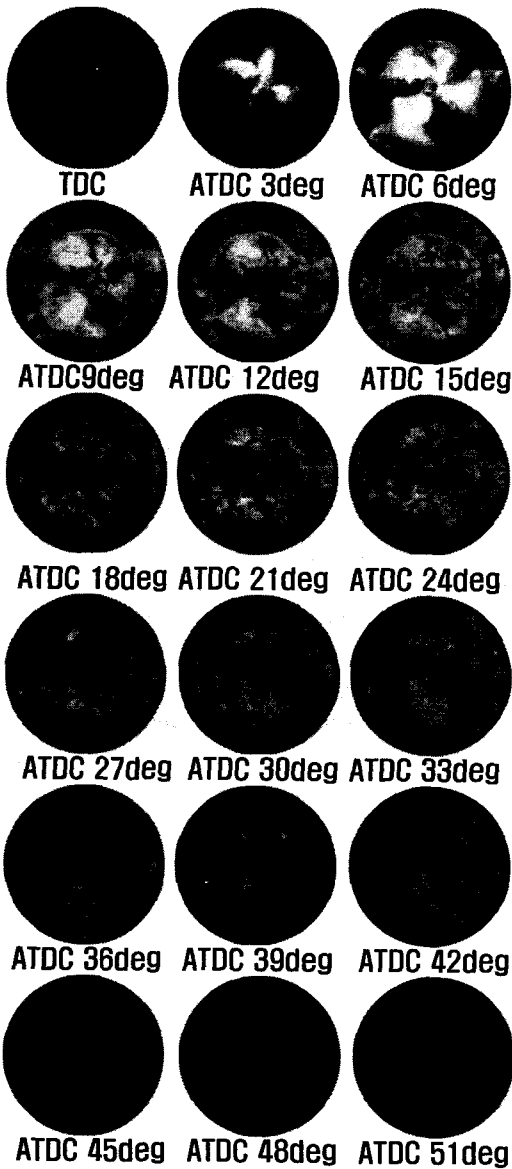


Fig 9 Images of flame luminosity using Hi-Speed Camera

의 분포는 벽쪽에서 사라져가는 것을 확인 할 수 있으며 90° 이후로는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 soot의 경향은 실린더 내부 벽면온도에 어느 정도 민감함을 알 수 있다.

또한 피스톤 스퀴시 영역에서 본다면 LIS신호와 LII신호는 비균일성을 띠고 있다. 스퀴시 영역은 보울 바닥보다 헤드사이에서의 높이가 낮고 실린더 벽과 거리가 가깝기 때문에 soot의 생성과 소

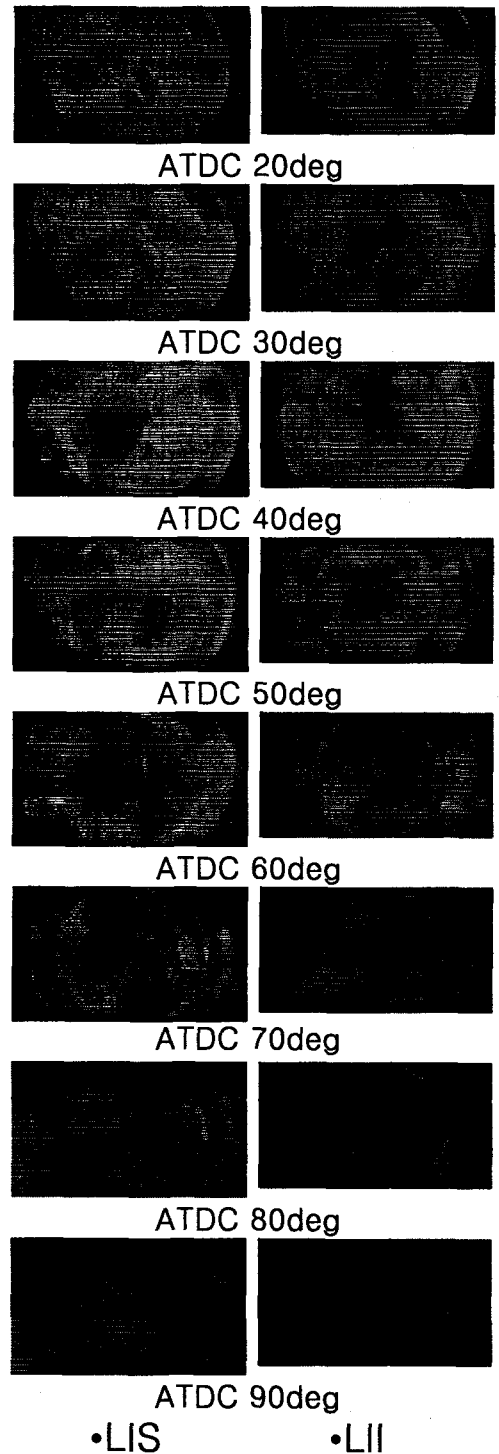


Fig 10 2-D images soot distribution by LIS and LII

멸의 시간이 보울보다는 짧다고 추측된다.

또한 분무된 액적연료는 대부분 보울안에 분사 되기 때문에 soot의 생성량은 보울이 더 많기 때 문이기도 하다. Fig 9의 초기 화염부분을 보면 알 수 있다.

soot의 전체적인 성향을 본다면 연소후기로 갈 수록 soot의 2차원 면적이 적어짐을 알 수 있고, Fig 9에서도 연소후기 때는 자발광의 광도가 적 어짐을 알 수 있다. 하지만 자발광과 레이저 진 단신호는 각각 측정된 신호의 위치가 다르기 때 문에 완전한 관계를 맺기에는 무리가 있어 보인 다.

soot의 분포는 2차원영상이기 때문에 전체적인 양을 측정하기에는 부족하며, 관찰창의 재질이 아크릴이기 때문에 높은 온도로 인한 보울의 형 상이 변형을 일으키며 soot과 같은 이물질이 달 라붙기 쉬워 20장을 연속촬영시에 후반부로 갈수 록 깨끗한 영상을 얻기는 힘들다. 따라서 재질의 보완이 필요하다.

4. 결론

고속 디지털 카메라와 인텐시파이어를 통해 화염의 연속 자발광을 촬영하였으며, LIS와 LII를 통해 soot의 분포 영상 데이터들을 취득하였다.

1) 후기 연소시 2차원 soot의 경향을 알 수 있었 으며 후기로 갈수록 보울 중심에서부터 보울벽 주변으로 soot의 양이 줄어드는 것을 알 수 있었 다.

2) soot의 경향은 보울에서는 어느정도 균일성을 가지고 소멸되지만 스퀴시영역에서는 일관성이 없이 생성되고 소멸됨을 알 수 있었다.

3) soot의 경향은 ATDC50° 까지 나타나고 있고 ATDC60° 이후로는 점차적으로 소멸되어 가는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) John E. Dec, Axel O. zur Loye, Dennis L. Siebers, "Soot Distribution in a D.I. Diesel

Engine Using 2-D Laser-Induced Incandescence Imaging", SAE paper no. 910224, 1991

- (2) John E. Dec, "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Imaging of Laser-Induced Incandescence, Elastic Scattering, and Flame Luminosity", SAE paper no. 920115, 1992.
- (3) John E. Dec, Christoph Espey, "Soot and Fuel Distribution in a D.I. Diesel Engine via 2-d Imaging", SAE paper no. 922307, 1992.
- (4) John E. Dec, Christoph Espey, "Ignition and Early Soot Formation in a DI Diesel Engine Using Multiple 2-D Imaging Diagnostics", SAE paper no. 950456, 1995.
- (5) Pinson, J. A., Mitchell, D. L., Santoro, R. J., and Litzinger, T. A., "Quantitative, Planar Soot Measurements in a D.I. Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence and Light Scattering", SAE paper no. 932650, 1993.
- (6) Gregory J. Hampson, Rolf D. Reitz, "Two-Color Imaging of In-Cylinder Soot Concentration and Temperature in a Heavy-Duty DI Engine with Comparison to Multidimensional Modeling for Single and Split Injections", SAE paper no.980524, 1998.
- (7) 조성룡, "이색법을 이용한 직접 분사식 디젤 엔진의 화염온도 및 Soot 농도 분포 측정에 관한 실험적 연구", 건국대학교 석사학위논문, 1997.
- (8) 원영호, "레이저 시트광을 이용한 엔진 연소진단 기술", 디젤기관 배기 배출물 저감대책 기술 WORKSHOP, pp33-54, 1997.
- (9) 이명준, 박태기, 하종률, 정성식, "레이저시트광을 이용한 가시화 디젤엔진에서의 Soot 계측", 한국자동차공학회논문집 제8권 제 2호, pp64-71, 2000